

# 数据同化在浅海温度同步性调查中的应用\*

宣基亮<sup>1</sup> 黄大吉<sup>1,2,①</sup> 周 锋<sup>1,2</sup> 朱小华<sup>1,2</sup> 樊孝鹏<sup>1</sup> 倪晓波<sup>1</sup> 邢传玺<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 杭州 310012;

2. 浙江大学海洋科学与工程学系 杭州 310058)

**提要** 建立了一个功能较为完善的四维同化系统,解决了温度调查资料中存在的同步性问题。为了检验同化方法和模式程序的正确性,以及讨论同步性误差的校正效果,从同化结果与锚系调查数据、同化结果与遥感数据、比对断面均方根误差和海表平均温度 4 个方面进行了探讨,结果表明: 1) 同化结果与锚系调查数据对比显示,改进参数的 NMC 方法(来自美国国家气象中心)能够适用于长江口外海域中的温度四维同化,同化温度结果与锚系调查数据在变化趋势上一致,在数值上最大差异不超过 0.4℃; 2) 同化结果与遥感数据对比显示,同化结果能够将调查资料推演到完整的时空范围,并具有较好的变化趋势和精度; 3) 根据比对断面均方根误差分析,调查资料中两个比对断面温度间的均方差误差为 3.8℃,而同化结果与实测数据的均方根误差低于 0.6℃,说明同化方法有效地降低了调查资料中的同步性误差; 4) 海表平均温度分析显示,同化结果能够避免调查不同步引起的各种温度斑块,并且其温度分布和锋面结构能够更如实地反映实际情况。

**关键词** 数据同化, 浅海调查, 长江口邻近海域, 同步性

**中图分类号** P731.1, P731.2

绘制海洋调查要素的空间分布图,并利用它们进行海洋学研究时,习惯上假定这些要素是同步观测的,即认为它们是同一时刻的值或同一时间段内的平均值。目前,除遥感手段具有对较大空间范围进行同步观测外(樊辉等, 2010; 邢飞等, 2010),传统的船只调查是无法做到同步观测的,而后者恰恰是目前进行海洋调查的最主要手段,尤其是对表层以下海洋要素的观测。这样,应用船只调查所获得的资料进行海洋学研究时,就不可避免地遇到了资料同步性的问题,也就是如何使用不同步的观测资料才不至于产生虚假的现象或者得出错误的结论。

在开阔大洋中,调查时间一般在 1 个月左右,由于人们关心的主要问题是较长时间尺度的月、季、年等现象,在调查期间内海洋要素变化不大或者它们的变化比所关心的现象的变化要小得多,同步性问

题不是一个严重的问题。然而在浅海,由于要素本身的变化往往是与人们关心的现象的变化是相当的,同步性问题就相当突出。

早在全国海洋普调期间,赫崇本等(1959)就对浅海水文调查的同步性问题进行了深入的研究,指出浅海调查同步性问题十分突出,由两条船同时对一个海区进行调查,由于观测的先后次序不同,得出判若两个海区的现象;并根据浅海水文要素变化的特点及其产生的原因,把浅海调查资料同步性问题归纳为三类: 1) 气象、陆地水文和海洋水团变化引起的逐日变化; 2) 太阳辐射、潮流、温跃层内波引起的周日变化; 3) 风暴和大河河口附近洪水吐洩引起的临时变化;还提出了消除各种变化最基本的办法,是尽早解决海洋自记观测仪器的问题,通过长期观测,获得各类变化的规律,进而利用这些规律对不同

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目,2011CB409803 号, 2011CB403503 号, 2006CB400603 号; 我国近海海洋综合调查与评价(908)专项, 908-01-BC06, 908-ZC-I-01 号; 国家自然科学基金项目, 41176021 号; 浙江省自然科学基金项目, Y5110014 号; 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助, JG1010 号。宣基亮, 助理研究员, E-mail: xuanjiliang@gmail.com

通讯作者: 黄大吉, E-mail: djhuang@sio.org.cn

收稿日期: 2011-02-12, 收修改稿日期: 2012-02-15

步的资料归一到同步资料上,得到同步的海洋要素空间分布规律。然而,浅海长期观测不仅存在自记观测仪器本身的问题,同时存在观测的可能性问题,受频繁的渔业活动的影响,浅海长期观测的风险高代价大,是一个尚待攻克的国际性难题。这可能是浅海同步性问题既没有引起重视,也没有解决的主要原因之一。

近些年来,随着浅海海洋调查的日益增多,获得了大量的调查资料,为了更客观地反映各种海洋要素的空间分布,更好地把观测数据应用于海洋学研究,解决浅海调查中资料同步性问题的需求更为迫切。

随着计算机技术的发展,四维资料同化方法已成为解决同步性问题的有效途径之一,该方法利用海洋动力模式把有限的调查资料在一定的动力和热力条件约束下推演到完整的时空分布上。资料同化方法已广泛地应用到气象观测资料的初始化和动力数值预报中(Bengtsson, 1975; Bouttier *et al.*, 2002),随后许多科学家尝试将各种同化方法用于海洋研究,并相继建立了用于大尺度海洋变化和气候预测研究的海洋资料同化系统(Derber *et al.*, 1989; Ji *et al.*, 1995; Zhu *et al.*, 2006),如集合卡尔曼滤波(Reichle *et al.*, 2002; Houtekamer *et al.*, 2009)和伴随方法(Thacker *et al.*, 1987)已应用于海洋问题研究。

根据以往在长江口邻近海域(东经 120°—126°E, 北纬 33°—38°N)的调查和研究结果(邱道立, 1992; 海洋图集编委会, 1992),温度旬平均变化是产生调查同步性问题的主要原因。首先温度周日变化引起的同步性问题可以用日变化来衡量,其平均值约为 1.3°C;其次温度逐日变化引起的同步性问题可以用日平均、旬平均或者月平均变化来衡量,它们的平均值分别约为 0.61°C、2.8°C 和 4.6°C。因此在不考虑风暴等临时性变化作用的前提下,去除由旬平均变化引起的温度误差已经能够较好地解决该海域调查资料中的同步性问题。

为了解决我国近海海洋环境调查研究项目长江口邻近海域调查资料中由旬平均变化引起的同步性问题,本文首先建立了一个功能较为完整的温度资料的四维同化系统;为了检验同化系统的有效性,分别将同化结果与锚系调查数据和遥感数据进行对比分析;从对比断面均方根误差和海表平均温度两个方面探讨了同步性问题。通过以上研究,有望得出同步性较好的调查期间调查海域中连续分布的温盐数

据,使目前数量较多的常规调查资料得到充分利用。

## 1 数值求解方案

资料同化系统由四部分组成,分别是海洋动力模式、观测资料、数据同化方法和四维同化过程。首先利用海洋动力模式进行预估步计算,得到初始预报场;其次结合观测资料,利用数据同化方法得到分析场数据;最后通过四维同化过程,得出收敛的预报场。

### 1.1 海洋动力模式

这里采用的动力模式是美国麻省理工学院的 MITgcm 模式(Marshall *et al.*, 1997; Marotzke *et al.*, 1999),求解方程组如下:

$$\frac{\partial \vec{V}_h}{\partial t} = G_{vh} - \nabla_h p \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = G_w - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = G_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = G_S \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (6)$$

式中  $\vec{V} = (\vec{V}_h, w) = (u, v, w)$ ,  $G_{vh}$ ,  $G_w$ ,  $G_T$ ,  $G_S$  分别为速度水平分量、垂直分量以及温度和盐度的显式项。在模式的求解过程中压力由整个海区联立求解,温度和盐度由每一个网格垂直水柱隐式求解。

利用该模式进行预估步计算时,为了使预估尽可能接近真值,模式范围定为包含渤、黄、东海的较大区域(114°—134°E, 22°—41°N),分辨率为 1°/12,垂向分为 18 标准层,内模态时间步长为 90 s;并且加入与调查资料同期的初始和边界资料,使预估能够较好地消除初始条件和边界条件带来的误差。海洋动力模式所用的资料,以及初始和边界条件如下所述:

海底地形采用韩国学者 Choi(2001)在第 11 次 Pams-Jecss 会议提供的数据,分辨率为 1°/60。Chang 等(2003)指出线性插值方法可能使一些网格点上的地形数值误差过大,本文通过体积守恒原则插值方法得到模式分辨率地形。

初始温度和盐度采用《渤海、黄海、东海海洋图集》(海洋图集编委会, 1992)提供的多年月平均的 1 月份的数据,分辨率为 1°/6,垂向分为 18 标准层,通过线性插值将温盐初始值插值到模式网格点。初始流速设置为零。

模式边界资料包括海表风场、辐射、蒸发和降水、长江径流以及开边界温度、盐度、水位和海流资料。其中,海表风场资料来自 QuikSCAT[2009]<sup>1)</sup>的 6 h 平均资料,分辨率为 1°/4;辐射、蒸发和降水资料来自 OAFLUX[2009]<sup>2)</sup>的日平均资料,分辨率为 1°/2;长江径流资料来自大通水文观测站日流量数据[2009]<sup>3)</sup>;开边界温度、盐度和流速资料来自樊孝鹏等(2006)嵌套方法得到的西北太平洋海区数值结果,分辨率为 1°/4,时间间隔为 1 d。各种边界资料均采用线性插值得到模式网格数据点。

通过调整该海区的总水量平衡,模式运行了 3 a 后,该海域的温度场和海流场均已达到准周期稳定状态,将此时的模拟结果作为初始预报场,用于接下来的同化计算过程。

### 1.2 观测资料及数据同化方法

同化计算使用的观测资料包括 2006 年夏季和 2007 年秋季长江口温度资料,该资料调查站位(图 1)密集,调查持续时间较长,因此观测资料时间分布较为稀疏。针对该观测资料特征,为了使该观测场能够与预报场较好地结合并求解真值,采用的数据同化

方法包括误差协方差计算和最优化问题求解。

误差协方差反映预报场与真值,以及观测场与真值之间的相关性,为求解背景误差协方程矩阵和观测误差协方差矩阵,本文测试了改进参数的 NMC 方法(Wafaa, 2000; Rabier *et al*, 1998)和更新矢量方法(IV 方法)(Rutherford, 1972; Hollingsworth *et al*, 1986)。其中, NMC 方法利用在同一时刻两个不同时效的预报偏差量来描述误差的增长,以这些偏差量作为样本来估计误差协方差,本文利用模式平流微分关系式改进了偏差量的求解,得到误差分布随模式积分过程的变化; IV 方法的求解思路是先求取观测与初始预报值间的偏差量,该偏差量等价于观测误差与背景误差之差,并通过合理假设分离观测误差与背景误差。

最优化问题求解基于变分原理的最优插值(OI)方法(Lorenc, 1986; Ido *et al*, 1997),其中空间客观分析技术采用了 OI 方法,但在求解代价函数时采用了变分方法,避免了传统 OI 方法在选取观测资料上高代价和任意性,使得空间上所有的观测资料都可以用于同化分析。该方法具体求解目标是确定观测量  $y$

所处时间段内分析场  $X_a$ ,使它与该时间段动力模式求解得到的预报量  $X_f$ 的离差,以及与实际观测的离差在考虑其他必要约束的前提下达到极小,也即求分析场  $X_a$ 使以下的目标泛函  $J$  达到极小:

$$J = (X_a - X_f)^T B^{-1} (X_a - X_f) + (y - HX_a)^T R^{-1} (y - HX_a) \quad (7)$$

这里,  $H$  为模式空间转换为观测空间的算子,本文根据模拟结果用线性插值方法得到各观测点要素的  $H$ ;  $B$  与  $R$  分别是背景误差和观测误差的协方差矩阵。由于  $B$  是一个超大规模的矩阵,且接近病态,直接求解方程(7)的极小化较为困难,本文采用逐点分析法(Gilehrst *et al*, 1954)和分组法(Houtekamer *et al*, 1998)减少

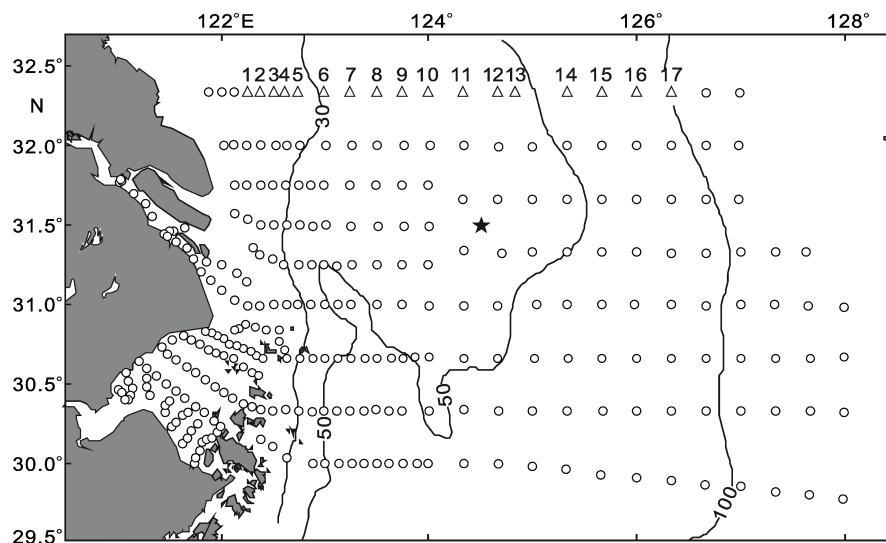


图 1 长江口邻近海域调查站位分布(圆形是大面站,三角形是 32.3°N 比对断面站位,五角形是锚系站)

Fig.1 Locations of survey stations in the investigated area off the Changjiang estuary. Circles and triangles indicate general survey stations, among which the section represented by triangles is used as a comparison to the studies in the following context. The pentangle represents a mooring station

1) Scatterometer data products of remote sensing systems [2009-01-20]. <http://www.remss.com>

2) Objectively analyzed air-sea fluxes project of Woods Hole oceanographic institution [2009-01-20]. <http://oafux.whoi.edu>

3) 中国水文水资源科学数据共享网[2009-01-20]. <http://www.hydrodata.gov.cn>

了求逆矩阵的维数,使  $J$  极小化求解计算量大为降低。

### 1.3 四维同化过程

四维同化过程分为预报计算步和分析计算步(图 2),通过两者循环计算,得出收敛的预报场。预报计算步利用海洋动力模式求解预报场,计算区域定为存在观测资料的长江口邻近海域(120.5°—128.5°E、29.5°—32.5°N),分辨率、垂向分层和时间步长均与预估步一致。预报计算步主要是利用海洋动力模式模拟得出预报场,其中,预报计算步第一次循环采用的初始和边界条件使用预估步计算结果,之后的初始和边界条件均使用分析计算步得到的分析场修正。分析计算步主要通过数据同化方法,引入观测资料对模式预报状态进行重新分析,求得分析场。

随着模式预报和同化分析地循环运行,得到各计算步预报场和分析场分别与观测场之间的均方根误差  $S_k$ (图 3A),分析场均方根误差变化显示分析值总是较接近观测值;预报场均方根误差变化显示其不断减小,并快速接近分析场均方根误差,同化过程最终收敛于第 4 次循环。因此,最终得到的温度预报值在变化趋势上能够满足动力方程(1)—(6)要求,并且数值上接近观测值。

## 2 同化结果及讨论

为了检验同化方案和程序的正确性,以及讨论同步性误差的校正效果,本文从同化结果与锚系调查数据、同化结果与遥感数据、比对断面均方根误差和海表平均温度 4 个方面进行了探讨。

### 2.1 同化结果与锚系调查数据

为了检验同化结果的正确性,首先将同化所得的底部温度与锚系调查资料进行比较,其中锚系调查站位于 124.5°E, 31.5°N(图 1),调查时间为 2006 年 7 月 21 日—8 月 9 日共计 20d,并预先将锚系观测温度与大面观测温度进行回归校正,去除不同仪器之间的系统偏差。

利用改进参数的 NMC 方法和 IV 方法同化结果,分别得出对应于锚系观测位置和观测时间的温度同化结果,并与锚系观测温度进行对比(图 3B)。结果显示改进参数的 NMC 方法得到的同化温度变化趋势与观测所得结果一致,两者均表现出在该时期内具有约 3.5℃的增温过程,数值上最大差异位于初始时刻,

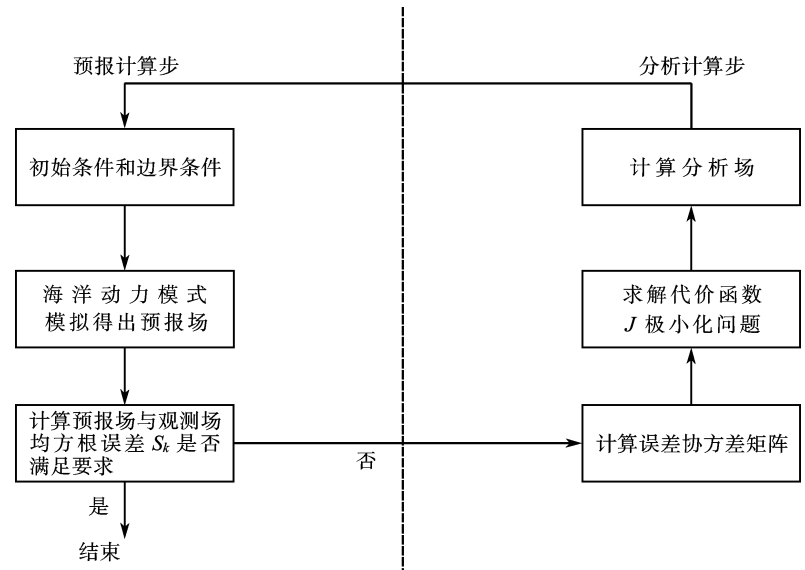


图 2 四维同化过程计算流程图

Fig.2 Flowchart of the 4-dimensional assimilation procedure

约为 0.4℃; IV 方法得到的同化结果也呈增温趋势,但在该时期内增温幅度较小,约为 2℃,且与观测温度差异较大,最大可达 1.2℃。上述结果说明,改进参数的 NMC 方法更适合长江口邻近海域温度四维同化,其与锚系观测数据的差异也说明本文得出的同化结果基本符合实际情况。

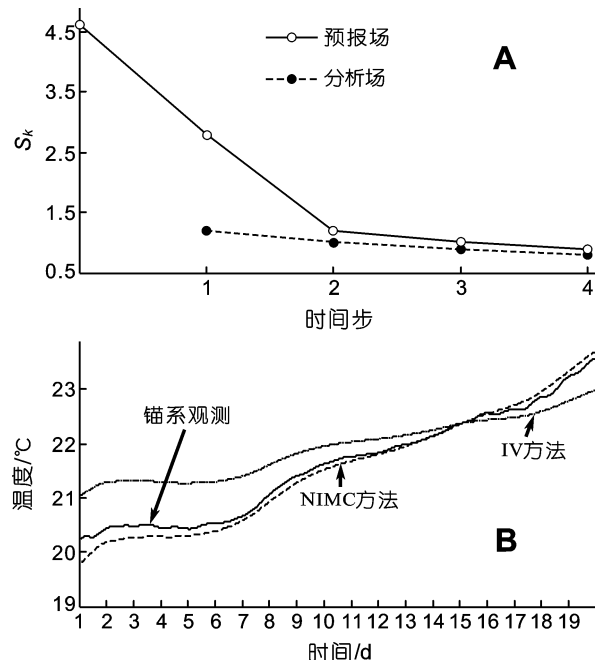


图 3 (A)均方根误差随时间变化情况;(B)同化温度与锚系观测温度对比

Fig.3 (A)Evolution of Root Mean Square error with time; (B)Comparison between the assimilated temperature derived from NMC method

### 2.2 同化结果与遥感数据

为了进一步验证同化结果能够得出该海域温度的旬变化趋势, 选择调查开始(2006 年 7 月 20 日)、中间(8 月 5 日)和结束(8 月 20 日)三个阶段的结果来进行比较, 将同化所得的夏季海表温度与同步的遥感海表温度进行对比(图 4—图 6), 其中遥感海表温度来自 AVHRR[2009]的日平均资料, 分辨率为 9km×9km。对比结果表明两者海表温度结构基本一致, 并且在数值上较为接近, 三个阶段的海表温度结构特征为: 1) 2006 年 7 月 20 日(图 4), 研究海域东北部具有一个较大的低温中心, 调查显示该低温中心温度约小于 23℃, 长江口和舟山群岛以外海域具有明显的南北带状分布的低温带, 调查显示该低温带约闭合于 23℃等温线, 而在低温带西侧所处的长江口和杭州湾附近海域温度较高, 低温带的东侧存在朝西北方向延伸的暖舌(暖舌温度大于 25℃, 向北超过 31°N); 2) 2006 年 8 月 5 日(图 5), 长江口和舟山群岛外海域的低温带仍十分明显, 低温带西侧仍然为高温区域, 而研究海域东北部的低温中心和低温带东侧的暖舌已经基本消失; 3) 2006 年 8 月 20 日(图 6), 近岸低温带仍然是最主要的特征, 低温带两侧均为高温区域。

另外, 从用观测结果直接绘图得到的海表温度结构(图 7)来看, 低温带与低温带两侧高温区域的总体结构不变, 但是该结构不能反映调查开始、中间和

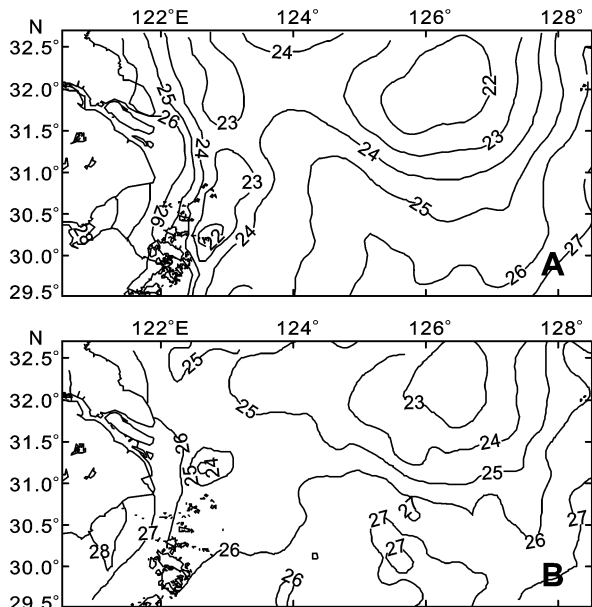


图 4 2006 年 7 月 20 日海表同化温度与遥感资料对比 (A 是同化温度, B 是遥感温度)

Fig.4 Comparison between the assimilated SST (A) and the remote sensing SST (B) in July 20, 2006

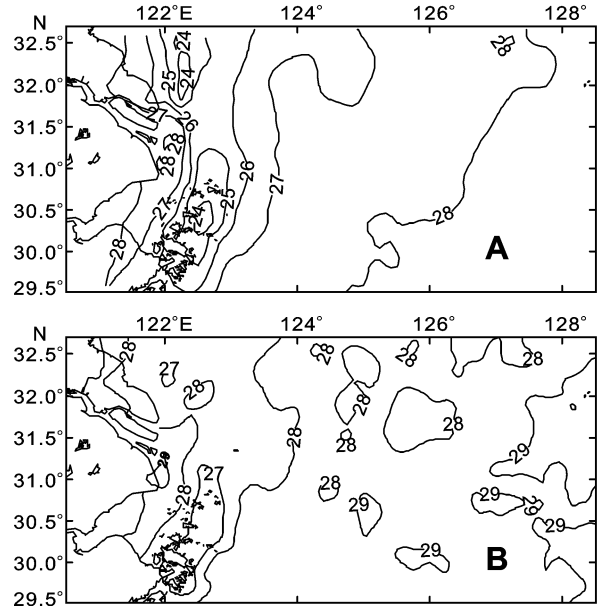


图 5 2006 年 8 月 5 日海表同化温度与遥感资料对比 (A 是同化温度, B 是遥感温度)

Fig.5 Comparisons between the assimilated SST (A) and the remote sensing SST (B) in August 5, 2006

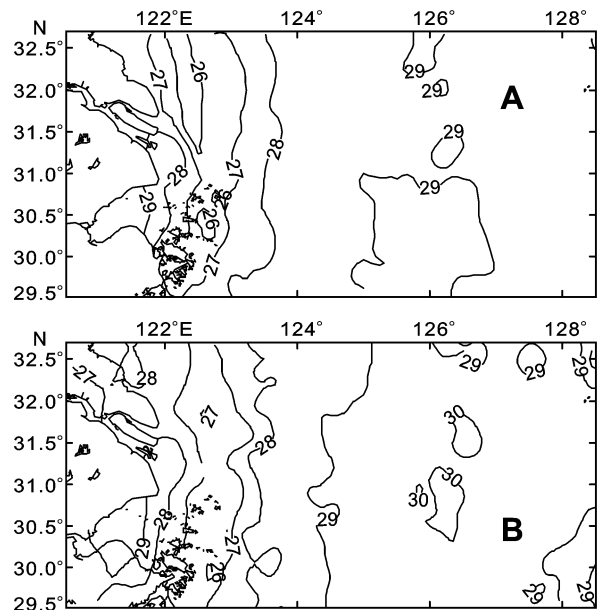


图 6 2006 年 8 月 20 日海表同化温度与遥感资料对比 (A 是同化温度, B 是遥感温度)

Fig.6 Comparisons between the assimilated SST (A) and the remote sensing SST (B) in August 20, 2006

结束三个阶段温度结构的变化特征, 例如调查开始时存在于东北区域低温中心和低温带东侧暖舌的逐渐消失过程。

上述对比也说明同化结果比调查资料更加接近实际情况, 能够将温度调查资料推演到完整的时空范围, 并能反映旬变化趋势和具有较好的精度。

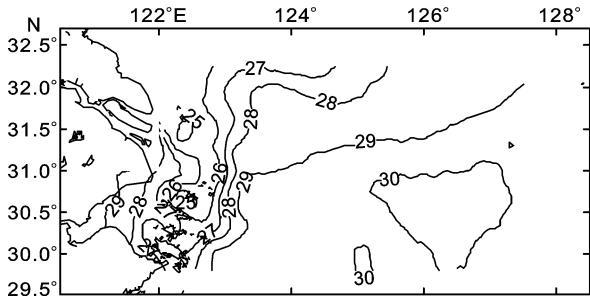


图7 2006年夏季调查资料直接所得的海表温度分布  
Fig.7 Observed SST in summer 2006

2.3 比对断面均方根误差

为了定量地得出长江口调查资料中的同步性误差大小,在长江口外 32.3°N 附近设置了比对断面(图 1)观测,在该断面进行了两次观测(分别记为 C1 和 C2),每次观测共计 17 个站位,观测时间分别为 2006 年 7 月 17—19 日和 7 月 29—30 日,两次观测间隔为 10 d。从比对断面表底层的温度分布情况(图 8)可以看出,两次观测表层温度平均差值约为 3°C,并且在远离岸边的海域差异较大,最大差值超过 6°C;底层温度平均差值约为 1.5°C,并且在靠近岸边的海域差异较大,最大温差超过 2°C。

另外,分析了比对断面温度剖面结构及其差异(图 9),结果表明: 1) C1 断面温度结构显示近岸表层温度较高,200 km 以外海域底部存在低温中心,

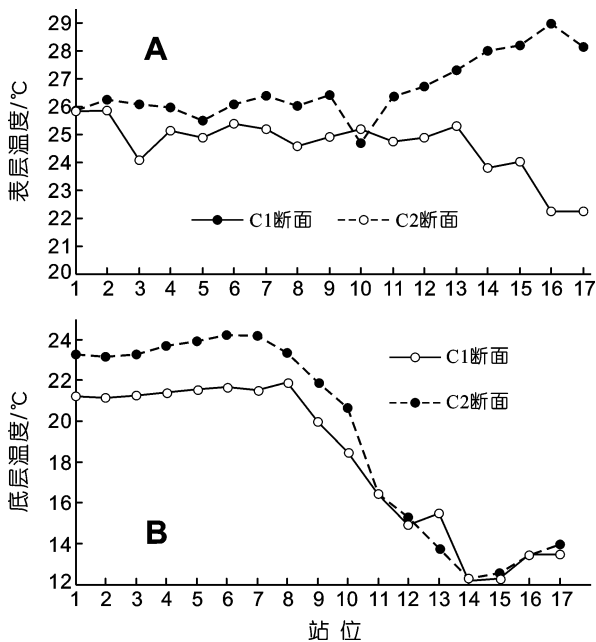


图8 2006年夏季调查资料比对断面表底层温度分布图  
(实线是 C1 断面,虚线是 C2 断面)

Fig.8 Temperature at the surface and bottom layers along the cross section C1 and C2 in summer 2006

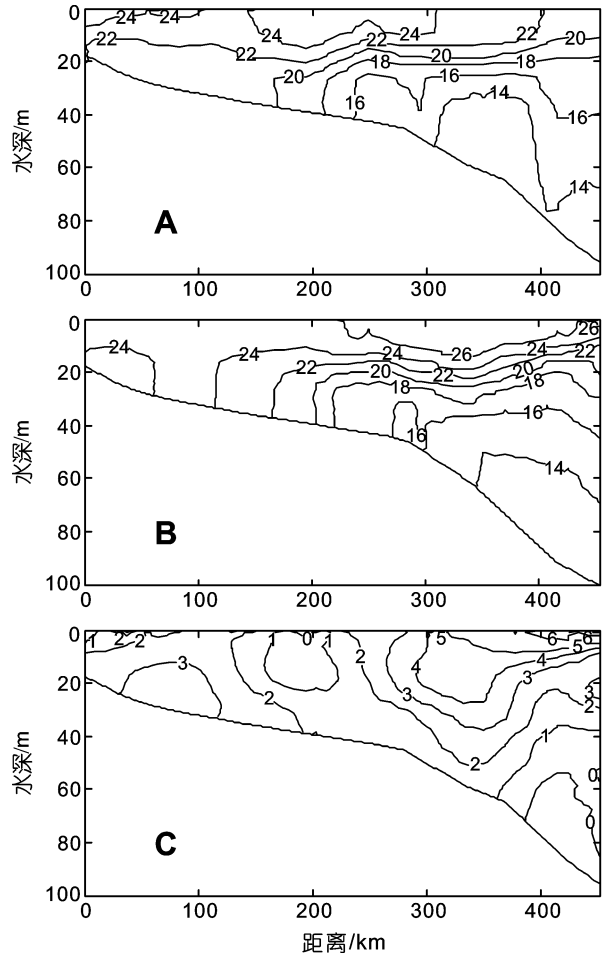


图9 2006年夏季调查比对断面温度剖面结构及其差异  
(A 是 C1 断面, B 是 C2 断面, C 是 C1 和 C2 差值)

Fig.9 Distributions of observed temperature profiles in comparative sections of C1 (A) and C2 (B) in summer 2006, and their differences (C)

18—24°C 等温线位置显示跃层主要位于 300 km 以内的近岸区域,且跃层并不明显; 2) C2 断面温度结构显示温度高值区、低值区和跃层均位于 200 km 外海域,且跃层较为显著; 3) 从 C1 和 C2 温度差异来看, C2 断面温度普遍高于 C1 断面,仅在约 300 km 以外海域底部略低,其最大温度差值超过 6°C,均方根误差达到 3.8°C。上述比较说明在比对断面中,相隔 10 d 的两次观测差异十分明显,即由于调查时间不一致造成的同步性误差较为明显。

相比于观测结果,同化结果得到的温度场在观测时间段内连续分布,不存在同步性问题。将同化结果中的时间与比对断面观测时间对应,得到比对断面同化结果(图 10),温度剖面结构随着时间不同而变化,并且与调查资料对应时间的结果(图 9A、B)相一致。进一步计算了两个剖面温度同化结果和实测结果

之间的差异(图 11), 结果显示差值基本在 1°C 以内, 均方根误差小于 0.6°C, 说明同化结果与观测结果吻合较好, 并且该差异(0.6°C)远小于调查资料中的同步性差异(3.8°C)。

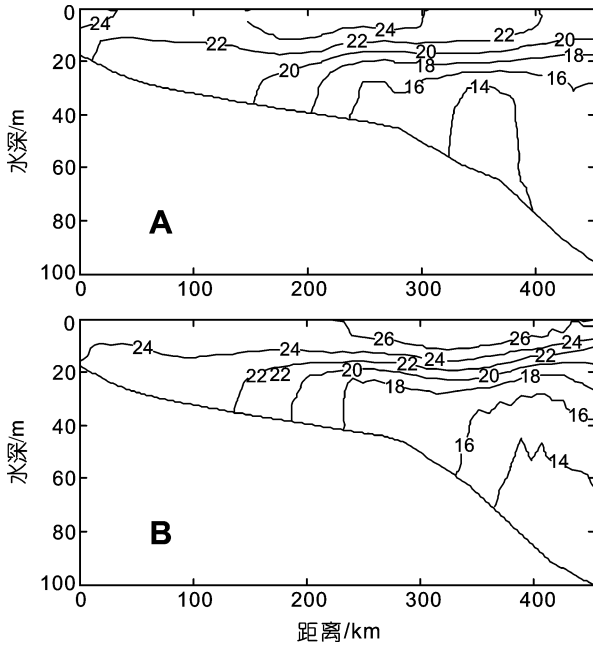


图 10 2006 年夏季比对断面温度同化模拟结果 (A 是 C1 断面, B 是 C2 断面)

Fig.10 Distributions of the assimilated temperature profiles in comparative sections of C1 (A) and C2 (B) in summer 2006

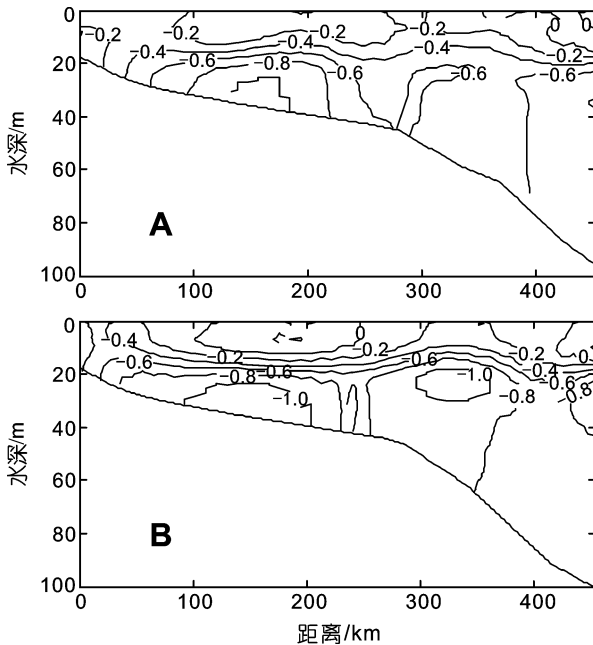


图 11 2006 年夏季比对断面温度观测值和同化值的差异 (A 是 C1 断面, B 是 C2 断面)

Fig.11 Temperature differences between observations and assimilations in comparative sections of C1(A) and C2(B) in summer 2006

### 2.4 海表平均温度

利用调查资料进行海洋学研究时, 习惯上认为它们是同一时间段内的平均值, 然而, 由于同步性问题, 该平均值往往与实际中的平均场状态具有较大的差异。以海表平均温度为例, 首先分析了直接将观测资料作为平均值产生的同步性误差, 其次利用同化结果得到观测时间段内的平均值, 并对海表平均温度和锋面结构进行了探讨。

2007 年秋季调查资料直接绘制的海表温度分布(图 12, 简称观测结果)显示出较突出的同步性问题。

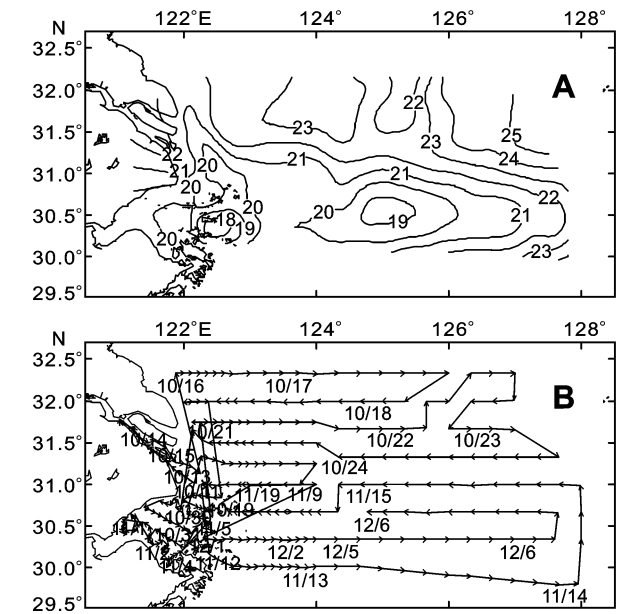


图 12 2007 年秋季调查直接绘制的海表温度分布及调查时间

Fig.12 Observed SST in autumn 2007, and the survey date is also presented along the tracking line

由于北部海域调查时间为 10 月 16—24 日, 而南部海域调查时间为 11 月 9 日至 12 月 7 日, 南北区域调查时间上的跃变导致南北温差十分显著, 其中, 北部海域温度普遍大于 22°C, 而南部大部分海域温度小于 22°C。另外, 将不同的调查时间所得温度值放在一起, 同步性问题往往表现为各种随调查断面分布的温度斑块, 如秋季航次 12 月 5—6 日调查期间得到的温度数值明显低于周围各断面温度, 形成一个较大的低温斑块(调查海域南部 20°C 等温线形成的闭合区域)。

将观测时间段内的同化模拟结果进行平均, 得到秋季平均温度分布情况(图 13)。结果显示同化所得的平均温度结构与观测结果具有显著差异, 同化温度场显示近岸温度较低, 远岸温度较高, 呈自西向东

升高趋势,并没有观测结果得到的南北显著温差。另外,同化温度场不会产生各种随调查断面分布的温度斑块,在南部海域不存在观测结果得到的较大范围低温斑块。

进一步分析了2006年夏季海表温度调查资料中的同步性误差。从调查资料直接绘制的表层温度分布来看(图7),并没有出现明显的随调查断面分布的温度斑块,说明夏季调查资料同步性误差比秋季小。然而,通过对表层温度进行最大梯度计算,得到的温度锋面分布显示(图14A),在调查断面中间区域往往出现较强的锋面,且锋面不连续分布于调查海域西部和中部区域,说明调查资料中的同步性问题仍然存在。

同化得到的夏季温度锋面分布显示(图14B),温度锋面基本位于该低温带的西侧区域,呈南北带状

分布且较为连续,该锋面结构与汤毓祥(1996)得出的结果基本一致。另外,根据图4—图6中各时刻同化温度场和遥感温度场结构,温度分布主要表现为长江口和舟山群岛外海域的低温带分布,这也说明夏季锋面应当在低温带分布区域较强。

同化所得的海表平均温度和锋面分别与观测结果的对比表明,同化结果能够避免同步性问题引起的各种温度斑块和不连续锋面,得到的温度和锋面平均场结构能够更好地反映实际情况,这也说明同步性问题在长时间的平均结果中得以较好地解决。

### 3 结论

(1) 建立了一个功能较为完善的温度四维同化系统,该系统包括海洋动力模式、观测资料、数据同化方法和四维同化过程。将同化结果与锚系观测数据和遥感观测数据进行对比检验,结果显示底部和表层的同化温度均与观测温度较好的吻合,并能够较好地显示温度的旬变化特征。

(2) 利用温度同化资料替代调查资料,能够较好地解决了温度调查资料中存在的旬平均变化引起的同步性问题。温度比对断面分析显示,由同步性问题引起的均方根误差约为 $3.8^{\circ}\text{C}$ ,而同化方法引起的均方根误差小于 $0.6^{\circ}\text{C}$ ,说明同化方法带来的误差远小于调查资料中的同步性误差。海表平均温度和锋面分析显示,同化结果能够避免时间不同步引起的各种温度斑块和不连续锋面,得到的平均温度分布和锋面结构能够更好地反映实际情况。

(3) 在利用同化结果解决的同步性问题时,如果该调查资料存在较大的短期变化,包括日平均变化、周日变化和临时性变化,这时用于这些短期变化的同化资料非常稀少,同化结果的精度必须深入分析。针对此类短期变化引起的同步性问题,需要在参数化方案优化和多源海洋观测数据同化两个方面进行深入研究。

致谢 海面风场遥感资料来自NASA的QuikSCAT,数据可以从<http://www.remss.com>网站获得,海表水温遥感资料来自NASA JPL的AVHRR,数据可以从<http://podaac.jpl.nasa.gov>网站获得。上述遥感数据的使用符合NASA关于科学研究应用数据协议的规定,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

邢 飞,汪亚平,高建华等,2010.江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征.海洋与湖沼,41(3):459—468

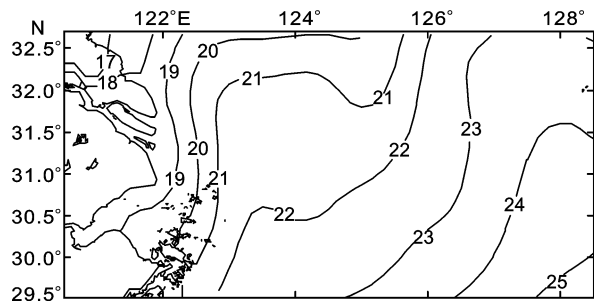


图 13 2007 年秋季平均温度同化模拟结果

Fig.13 Assimilated result of mean surface temperature in autumn 2007

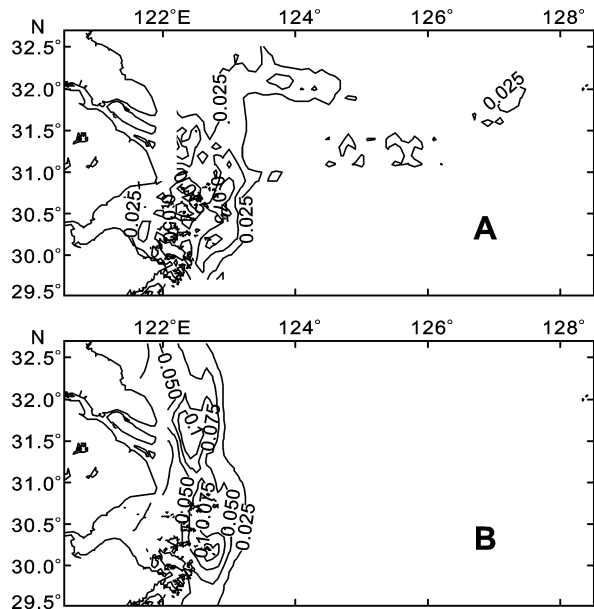


图 14 2006 年夏季温度锋面结构(A 是观测结果, B 是同化结果)

Fig.14 Thermal fronts in summer 2006, A. observations; B. assimilations



- 汤毓祥, 1996. 东海温度锋的分布特征及其季节变异. 海洋与湖沼, 27(4): 436—444
- 邱道立, 1992. 渤海及黄、东海近海区水温日变化特点分析. 海洋学报, 4(4): 391—403
- 海洋图集编委会, 1992. 渤海、黄海、东海海洋图集(水文). 北京: 海洋出版社, 13—168
- 赫崇本, 任允武, 1959. 浅海水文调查的一些问题. 海洋与湖沼, 2(1): 1—9
- 樊 辉, 黄海军, 2010. 黄、东海二类水体春季表观光谱特性与表层悬浮体浓度反演模式. 海洋与湖沼, 41(2): 161—166
- 樊孝鹏, 黄大吉, 章本照, 2006. 东海黑潮的气候态数值模拟. 浙江大学学报工学版, 40(5): 916—920
- Bengtsson L, 1975. Four-dimensional assimilation of meteorological observations. World Meteor Organization, International Council of Scientist Unions, Joint Organizing Committee: 75—96
- Bouttier F, Courtier P, 2002. Data assimilation concepts and methods with ECMWF. Meteorological training course lecture Series: 1—59
- Chang P H, Isobe A, 2003. A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Seas. Journal of Geophysical Research, 108(C9): 1—17
- Choi B H, 2001. Improved 2min Sand well dataset in shallow waters. Laboratory for Coastal and Ocean Dynamics Studies Sungkyunkwan University, Cheju, Korea: The Eleventh PAMS/JECSS
- Derber J, Rosati A, 1989. A global oceanic data assimilation system. Journal of Physical Oceanography: 1333—1347
- Gilehrst B, Cressman G P, 1954. An experiment in objective analysis. Tellus, 6(4): 309—318
- Hollingsworth A, Lonnberg P, 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data, Part 1: the wind field. Tellus, 38A: 111—136
- Houtekamer P L, Mitchell H L, Deng X, 2009. Model Error Representation in an Operational Ensemble Kalman Filter. Monthly Weather Review, 137(7): 2126—2143
- Houtekamer P L, Mitchell H L, 1998. Data Assimilation using an Ensemble Kalman Filter Technique. Mon Weather Rev, 126: 796—811
- Ido K, Courtier P, Ghil M *et al*, 1997. Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational. Journal of the Meteorological Society of Japan, 75: 181—189
- Ji M, Leetmaa A, Derber J, 1995. An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies. Monthly Weather Review, 123: 460—481
- Lorenc A, 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. Journal of the Royal Meteorological Society, 112: 1177—1194
- Marotzke J, Giering R, Zhang K Q *et al*, 1999. Construction of the adjoint MIT ocean general circulation model and application to Atlantic heat transport variability. Journal of Geophysical Research, 104(C12): 29529—29547
- Marshall J, Adcroft A, Hill L *et al*, 1997. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. Journal of Geophysical Research, 102(C3): 5753—5766
- Rabier F, McNally A, Andersson E, *et al*, 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var): Structure Functions. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124: 1809—1829
- Reichle R H, McLaughlin D B, Entekhabi D, 2002. Hydrologic data assimilation with the Ensemble Kalman Filter. Monthly Weather Review, 130: 103—114
- Rutherford I D, 1972. Data assimilation by statistical interpolation of forecast error fields. Journal of the Atmospheric Sciences, 29: 809—815
- Thacker W C, Long R B, 1988. Fitting dynamics to data. Journal of Geophysical Research, 93(C2): 1227—1240
- Wafaa S, 2000. Mesoscale background error covariance: Recent results obtained with the limited-Area model ALADIN over morocco. American meteorological society: 3927—3935
- Zhu J, Zhou G Q, Yan C X *et al*, 2006. A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results. Science in China Series D, Earth Sciences, 49(11): 1212—1222

## APPLICATION OF DATA ASSIMILATION TO SYNOPTIC TEMPERATURE MAPPING OF THE COASTAL OCEAN SURVEY

XUAN Ji-Liang<sup>1</sup>, HUANG Da-Ji<sup>1,2</sup>, ZHOU Feng<sup>1,2</sup>, ZHU Xiao-Hua<sup>1</sup>,  
FAN Xiao-Peng<sup>1</sup>, NI Xiaobo<sup>1</sup>, XING Chuan-Xi<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012*; 2. *Department of Ocean Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310058*)

**Abstract** A 4-dimensional data assimilation system is improved and applied to resolve the synoptic problem in the cruise survey data usages. The validation of the assimilation method is investigated with a set of inter-comparisons between the assimilated temperature and observed temperature from the mooring data, the remote sensing satellite data and the cruise data. 1) Comparisons between the assimilated temperature and the mooring observed temperature show that NMC (National Meteorological Center) method with modified parameters is more suitable than the IV (Innovation Vector) method in temperature data assimilation for sea areas off Changjiang estuary. The assimilated temperature is in same trend with the mooring observed temperature, with a maximum temperature difference of 0.4°C. 2) Comparisons between the assimilated sea surface temperature (SST) and the remote sensing SST show that assimilated SST are able to reproduce the spatial and temporal distribution of survey data, with better trend and accuracy. 3) The analysis of root mean square error (RMSE) indicates RMSE is 3.8°C and lower than 0.6°C for the observation section and assimilation section. This implies that errors caused by assimilation method are much lower than that caused by synoptic problem. 4) Analysis of surface mean temperature shows that using assimilation data can avoid unreal temperature patches, which is a mistake caused by synoptic problem, and the distributions of temperature and front got with the method are more likely to exhibit the real condition.

**Key words** Data assimilation, Coastal ocean survey, Sea area off the Changjiang estuary, Synoptic

---

### 2011 年度《海洋与湖沼》动态

(1) 《海洋与湖沼》2011 年最新公布的总被引频次在海洋科学期刊中名列第一位; 影响因子为 1.404, 学科影响指标和综合评价总分均列海洋科学期刊首位; 综合评价总分在全国科技期刊中排第 18 位。

(2) 荣获 2011 年度百种中国杰出学术期刊奖。

(3) 荣获 2011 年度中国精品科技期刊奖。